

УДК 681.7.068

ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В ОПТИЧЕСКОМ КВАРЦЕВОМ ВОЛОКНЕ ПРИ СУБНАНОСЕКУНДНОЙ НАКАЧКЕ*

П. Д. Рудыч, Н. В. Суровцев

*Институт автоматки и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: lab21@iae.nsk.su*

Исследовано вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) света в одномодовом оптическом кварцевом волокне при возбуждении субнаносекундным импульсом лазера с длиной волны 532 нм. Изучена зависимость мощности ВКР и его спектра от мощности лазерной накачки. Показано, что при относительно небольших мощностях накачки ВКР хорошо описывается экспоненциальной функцией, предсказываемой моделью в пренебрежении истощением накачки; при мощностях, когда наблюдается отклонение от этой зависимости, появляется дополнительное уширение полосы ВКР, величина которого зависит от мощности накачки. Характеристики уширения схожи с уширением лазерной линии в оптоволокне. Также наблюдалось интенсивное антистоксовое рассеяние на колебательных модах, избыточно заселённых в результате процесса ВКР.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние света, оптическое волокно, перестраиваемые лазеры.

Введение. Эффект вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) света состоит в рассеянии света на колебательных возбуждениях, индуцированных электромагнитной волной, и характеризуется резким возрастанием интенсивности неупруго рассеянного света при превышении некоторого порога, когда его интенсивность становится сравнимой с интенсивностью накачки. Этот эффект открыт давно [1] и применяется для преобразования частоты лазерного излучения и в активной лазерной спектроскопии. Обычно для превышения порога ВКР требуются мощные импульсные лазеры, а плотность мощности лазерного излучения в материале часто сравнима с порогом оптического пробоя. Ситуация резко меняется при использовании оптических волокон, которые позволяют сохранять высокую плотность сфокусированного излучения на длине оптоволокна [2]. Так как порог ВКР обратно пропорционален длине, то с помощью оптического волокна резко уменьшается значение порога, что даёт возможность применять ВКР при сравнительно низких плотностях мощности (например, [3]). В настоящее время использование ВКР в оптоволокне широко распространено.

В своей работе нам также хотелось использовать эффект ВКР в оптическом волокне для преобразования частоты лазерного излучения. Неожиданно мы столкнулись с дефицитом данных в литературе для параметров ВКР в силикатном оптоволокне при его возбуждении субнаносекундными лазерными импульсами с длиной волны в диапазоне 500–550 нм. Нам не удалось найти достаточно информации о пороге ВКР, конкурирующем вкладе параметрических процессов (распад двух фотонов накачки на два фотона, отличающихся по частоте), особенности формы спектральных полос ВКР. Поэтому нами проведено соответствующее исследование.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-03-00237а) и Партнёрского интеграционного проекта Сибирского отделения РАН № 18.

Цель предлагаемой работы — изучение эффекта ВКР в одномодовом силикатном оптоволокне при субнаносекундной накачке с длиной волны 532 нм.

Эксперимент проведён на образце одномодового волокна марки "Nufern 460-HP" длиной 1,5 м с рабочим диапазоном 450–600 нм. Конкурирующим процессом по отношению к ВКР является параметрическое рассеяние, которое эффективно при выполнении условия фазового синхронизма. В оптоволокне условие фазового синхронизма может быть выполнено за счёт двулучепреломления [4], поэтому для уменьшения возможного вклада от параметрических процессов необходимо избегать двулучепреломления, которое может быть индуцировано изгибом оптоволокна. В нашем эксперименте оптоволокно было уложено без изгибов.

Схема эксперимента по изучению ВКР представлена на рис. 1. Излучение импульсного лазера фирмы "Standa" с длительностью импульса 0,6 нс, длиной волны 1,06 мкм и частотой повторения 1 кГц преобразовывалось во вторую гармонику в нелинейном кристалле (КТР), после чего излучение на первой гармонике отсекалось дихроичным зеркалом. Мощность излучения, вводимого в сердцевину оптоволокна, варьировалась изменением коэффициента пропускания поглощающего фильтра. С помощью микрообъектива лазерное излучение на $\lambda = 532$ нм фокусировалось в сердцевину оптического волокна. Вышедшее из оптоволокна излучение преобразовывалось линзой в параллельный пучок, мощность которого определялась фотодиодным измерителем мощности фирмы "Thorlabs", калиброванным по болометрическому измерителю. Поскольку поглощением излучения можно пренебречь, мощность вышедшего излучения соответствует мощности излучения, заведённого в оптоволокно. В наших экспериментах мощность накачки была меньше порога генерации второго порядка ВКР. Для контроля спектр вышедшего излучения измерялся спектрометром фирмы "Avantes" в диапазоне 400–800 нм (на рис. 1 не показан).

Детальное исследование спектра вышедшего из оптоволокна излучения проводилось на трёхрешёточном спектрометре "TriVista 777" в режиме вычитания дисперсии. Использовалось спектральное разрешение 2 см^{-1} . Спектр излучения регистрировался охлаждаемой CCD-матрицей в режиме непрерывного накопления. Такой режим позволял не только достичь высокой чувствительности, но и уменьшить влияние флуктуаций интенсивности накачки от импульса к импульсу. Далее будут рассмотрены в основном результаты измерений в единицах средней мощности излучения. Для параметров лазера, применяемого в экспериментах, 1 мВт средней мощности соответствует пиковой мощности ~ 2 Вт.

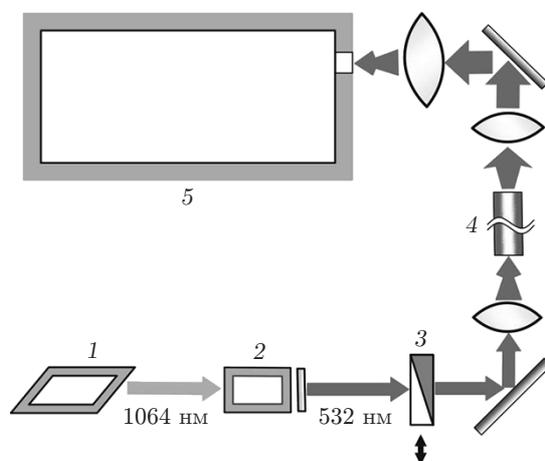


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению ВКР в оптоволокне: 1 — лазер; 2 — кристалл, генерирующий вторую гармонику и дихроичный фильтр; 3 — ослабляющий фильтр; 4 — оптоволокно; 5 — трёхрешёточный спектрометр

Спектр вышедшего излучения был измерен в диапазоне рамановского сдвига (разница частот рассеянного излучения и лазера накачки) от -700 до $+650$ см^{-1} . Для того чтобы получить спектр рассеянного излучения в таком диапазоне, использовались три последовательных измерения в диапазонах $-700 \dots -140$ см^{-1} ; $-300 \dots +300$ см^{-1} ; $+140 \dots +650$ см^{-1} . В ряде измерений интенсивность света, регистрируемого многоканальным детектором, значительно превышала интенсивность, допустимую по техническим характеристикам CCD-детектора. При этом перед спектрометром ставился ослабляющий фильтр (поглощающий нейтральный фильтр). В спектральном интервале $-300 \dots +300$ см^{-1} , включающем в себя лазерную линию накачки, интенсивность спектра варьируется в широких пределах. В данном случае проводились два измерения: одно с ослабляющим фильтром высокой оптической плотности, а другое без него (или с ослабляющим фильтром меньшей оптической плотности), но с «вырезанием» центральной части спектрального диапазона непрозрачной маской после первого монохроматора тройного спектрометра. Спектры в каждом диапазоне корректировались с учётом применённого ослабляющего фильтра и сшивались в единый полный спектр. На рис. 2 показан характерный пример изображения спектров различных интервалов. Интенсивность спектров скорректирована на коэффициент пропускания ослабляющего фильтра. Так получался спектр с высоким динамическим диапазоном. Например, на рис. 2 интенсивность спектра варьируется в диапазоне девяти порядков.

Поскольку в эксперименте использованы мощности накачки ниже порога генерации второго порядка ВКР, то можно считать, что весь спектр вышедшего из оптоволокна излучения (или, по крайней мере, его доминирующая часть) представлен в измеренном спектральном диапазоне (см. рис. 2). В этом случае интеграл по спектру можно сопоставить с мощностью излучения, определённой с помощью её измерителя. Таким способом спектры излучения, вышедшего из оптоволокна и измеренного тройным спектрометром, были пересчитаны в абсолютные единицы по интенсивности ($\text{Вт}/\text{см}^{-1}$).

Для того чтобы получить спектр спонтанного комбинационного рассеяния света (КРС) исследуемого оптоволокна, в него заводилось излучение непрерывного твердотельного лазера (модель Millennia II, фирма "Spectra Physics") с $\lambda = 532$ нм и спектр излучения, вышедшего из оптоволокна, был измерен по схеме, аналогичной рис. 2.

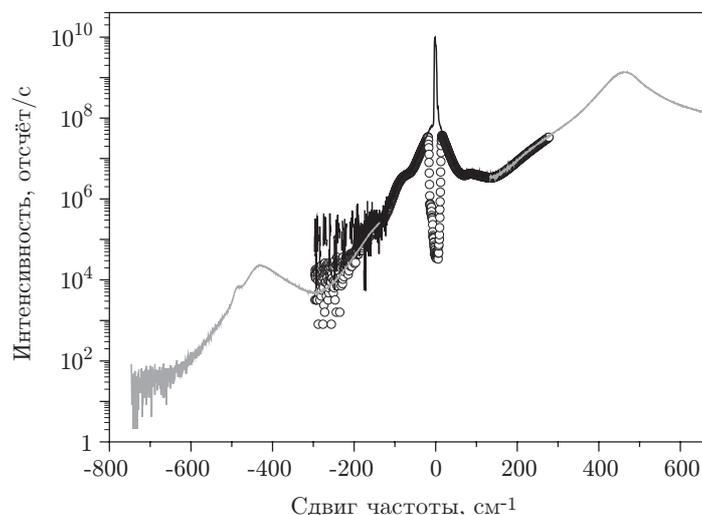


Рис. 2. Спектры ВКР, измеренные в различных спектральных интервалах. Кружками показан спектр в центральном интервале с использованием маски для части спектра, где доминирует вклад упругой линии

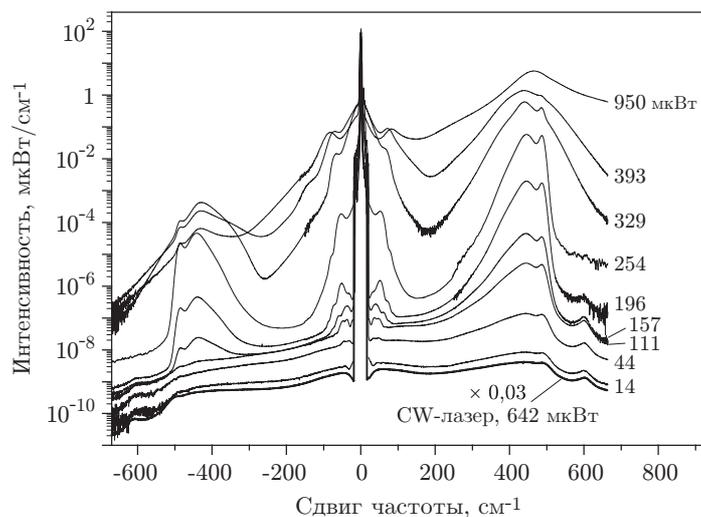


Рис. 3. Спектры ВКР при различных мощностях накачки импульсного лазера. Нижняя линия — спектр спонтанного КРС, полученного при накачке непрерывным лазером (изображённый спектр умножен на фактор 0,03 для сравнения)

Результаты и обсуждение. На рис. 3 показаны спектры вышедшего из оптоволоконного излучения при различных мощностях импульсной лазерной накачки. Для оси ординат использована логарифмическая шкала, что позволяет рассмотреть форму спектра в широком динамическом диапазоне. Для всех спектров, изображённых на рисунке, наиболее интенсивной является линия, соответствующая частоте лазера накачки. Значение интенсивности для максимума этой линии примерно пропорционально мощности накачки. Одна из особенностей спектра — в стоксовой части (положительный рамановский сдвиг) наблюдается полоса ВКР на колебательных состояниях кварцевого стекла с максимумом в области 450 см^{-1} . Интенсивность этой полосы меняется на несколько порядков при относительно небольшом изменении мощности накачки. При малой мощности накачки ($<30 \text{ мкВт}$) спектр излучения полосы становится похожим на спектр спонтанного КРС кварцевого оптоволокна. Для сравнения на рисунке показан спектр излучения, вышедшего из оптоволокна при накачке непрерывным лазером. Кроме ожидаемых полос, соответствующих лазеру накачки и полосе ВКР кварцевого стекла, можно отметить полосы, симметричные по положению и интенсивности, которые соответствуют параметрическому рассеянию. Полосы параметрического рассеяния появляются в низкочастотном диапазоне, их частоты растут с увеличением мощности накачки. Характерное значение положения полос параметрического рассеяния соответствует диапазону $40\text{--}75 \text{ см}^{-1}$. Экспериментально получено, что вклад параметрического рассеяния может зависеть от деталей: параметров излучения лазера накачки, скручено или нет оптоволокно. Однако нам не удалось реализовать такие условия эксперимента, чтобы вклад параметрического рассеяния отсутствовал. Поэтому далее низкочастотная часть спектра ВКР, где вклад параметрического рассеяния существен, обсуждаться не будет. Для рамановского сдвига свыше 150 см^{-1} заметного вклада от параметрических процессов в экспериментальный спектр не наблюдается.

Другая особенность спектров, изображённых на рис. 3, — появление интенсивной полосы в антистоксовой части спектра одновременно с интенсивным спектром ВКР. Наблюдаемое отношение стоксовой и антистоксовой интенсивностей отличается от случая спонтанного КРС. Для комнатной температуры и рамановского сдвига 450 см^{-1} стоксовая часть должна (согласно теории) превышать антистоксовую примерно в 10 раз [5]. Случай спонтанного рассеяния (см. рис. 3) хорошо соответствует этому ожиданию. Мощный ан-

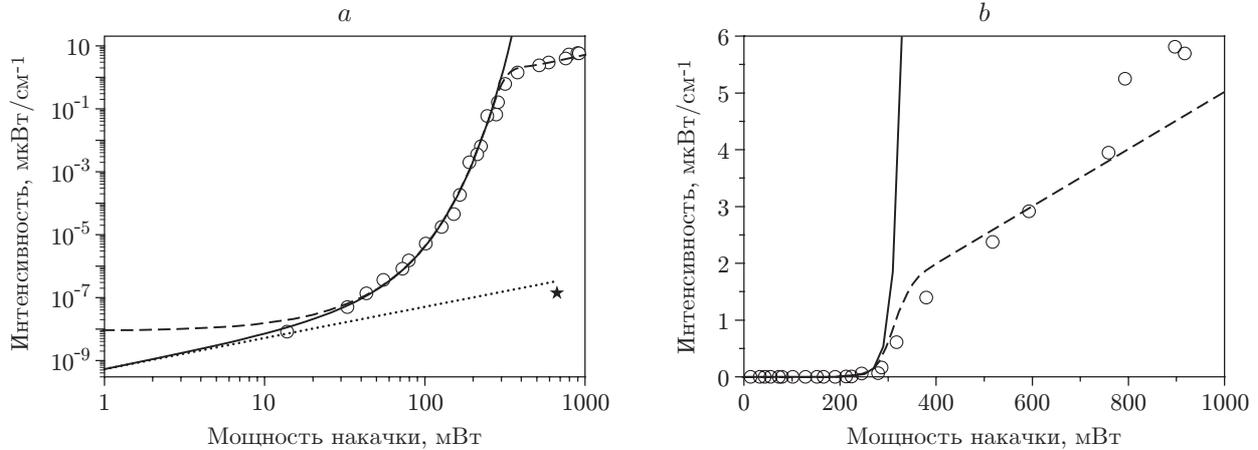


Рис. 4. Зависимость интенсивности максимума полосы ВКР от мощности накачки: *a* — двойной логарифмический масштаб (звёздочка — спонтанное КРС, полученное при накачке непрерывным лазером, пунктирная линия — экстраполяция спонтанного КРС), *b* — линейный масштаб. Кружки — сигналы ВКР, полученные импульсным лазером, сплошные линии — описание (3), штриховые — описание (4)

тистоксовый спектр, возникающий одновременно с полосой ВКР, на несколько порядков меньше, чем его стоксовый аналог (типично в 10^3 раз). По-видимому, появление полосы в антистоксовой части спектра соответствует режиму когерентного антистоксового рассеяния на колебательных модах, заселённых в результате процесса ВКР.

На рис. 4 изображена зависимость интенсивности максимума спектра ВКР (вблизи 450 см^{-1}) от мощности накачки. На рис. 4, *a* данные представлены в двойном логарифмическом масштабе для того, чтобы отразить большой диапазон изменения интенсивности ВКР. В случае непрерывного лазерного освещения (низкая плотность мощности) в спектре доминирует спектр спонтанного КРС. Так как интенсивность спонтанного КРС прямо пропорциональна мощности накачки, то результаты, полученные для непрерывного лазера, могут быть экстраполированы для других значений мощности накачки. Видно, что при малых мощностях накачки ($<30\text{ мВт}$) в спектре начинает доминировать вклад спонтанного КРС. Поэтому экспериментальные данные, изображённые на рис. 4, необходимо сравнивать с теоретическими формулами, включающими в себя вклад спонтанного КРС.

Уравнение, описывающее нарастание мощности полосы излучения ВКР P_S при прохождении в материале длины dz , имеет вид

$$dP_S/dz = \gamma P_0 + gP_0P_S, \tag{1}$$

где P_0 — мощность излучения накачки; γ — коэффициент пропорциональности для спонтанного процесса КРС; g — коэффициент пропорциональности для процесса ВКР. В (1) пренебрегается истощением накачки, поглощением излучения (короткое оптоволокно), генерацией ВКР второго и следующих порядков. Решение уравнения (1) при нулевой интенсивности P_S на входе в оптоволокно запишем в виде

$$P_S = \frac{\gamma}{g}(e^{gP_0z} - 1). \tag{2}$$

Если между различными компонентами полосы ВКР нет взаимодействия, то для спектральной плотности мощности полосы ВКР

$$I_S = B(e^{gP_0z} - 1), \tag{3}$$

где B является некоторой константой.

На рис. 4 видно, что выражение (3) хорошо описывает экспериментальные данные в интервале от малых мощностей накачки, где доминирует спонтанное КРС, до мощности накачки около 250 мкВт. В подгонке использованы значения $gz = 6,2 \cdot 10^4 \text{ Вт}^{-1}$ и $B = 8,6 \cdot 10^{-15} \text{ Вт} \cdot \text{см}$ (напомним, что эти значения соответствуют средней мощности). Пересчёт коэффициента усиления ВКР в единицах пиковой мощности и с учётом длины оптоволоконна 1,5 м даёт величину $g = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ для длины волны накачки 532 нм. Из известного значения коэффициента усиления ВКР кварцевого стекла, нормированного на плотность мощности, $1,9 \cdot 10^{-11} \text{ см/Вт}$ (например, [6]) и площади сердцевины оптоволоконна в нашем эксперименте $\sim 10 \text{ мкм}^2$ (диаметр моды 3,4 мкм) получаем оценку для коэффициента усиления $1,9 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, которая хорошо согласуется с оценкой из параметров подгонки на рис. 4.

Отклонение экспериментальных данных от теоретического выражения (3) происходит в области 260 мкВт ($\sim 500 \text{ Вт}$ пиковой мощности), где вклад ВКР превышает вклад от спонтанного КРС в 10^6 раз. Есть несколько причин для такого отклонения, среди которых обычно рассматриваются истощение накачки и генерация полос ВКР второго и следующего порядков. Ещё одной причиной для выполаживания зависимости интенсивности ВКР от мощности накачки является уширение линий накачки и ВКР в результате нелинейных эффектов (например, параметрические процессы).

Модель, представленная в работе [7], позволяет учесть влияние истощения накачки на генерацию ВКР. Рассмотрим случай, когда поглощением света в волокне можно пренебречь и мощность стоксовой компоненты связана со спектральной плотностью мощности через ширину полосы Δ : $P_S = I_S \Delta$. Тогда соответствующее выражение для мощности полосы ВКР в [7] приводит к следующему выражению:

$$I_S = \frac{B e^{g P_0 z}}{1 + B \Delta e^{g P_0 z} / P_0}, \quad (4)$$

где B играет роль затравочной интенсивности стоксовой компоненты. Результат подгонки экспериментальных данных выражением (4) показан на рис. 4 штриховой линией. Значение параметра Δ было выбрано 200 см^{-1} , а остальные параметры взяты такими же, как при подгонке выражением (3). Выбранное значение Δ несколько выше эффективной ширины линии полосы ВКР (например, описание гауссовым контуром в режиме, когда полоса ВКР интенсивна, даёт ширину порядка 100 см^{-1}), но находится в необходимых пределах. Из рисунка видно, что выражение (4), учитывающее истощение накачки, на качественном уровне описывает переход зависимости интенсивности ВКР от поведения вида (3) к более слабой функциональной зависимости.

Рассмотрим вопрос о форме линии спектра ВКР для достаточно больших значений коэффициента усиления. В этом случае величина экспоненты в выражении (3) велика. Тогда вторым слагаемым в скобке можно пренебречь и для логарифма интенсивности спектра получаем выражение

$$\ln(I_S(\omega)) \approx g(\omega) P_0 z + \text{const}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что при достаточно больших сигналах ВКР форма его спектра должна оставаться неизменной для логарифмической шкалы интенсивности. Удобно нормировать экспериментальные спектры на значение максимума, и тогда из выражения (5) можно ожидать, что форма спектров ВКР будет одинаковой (с точностью до вклада второго слагаемого в (5)). На рис. 5, а показана форма спектров ВКР для логарифмической шкалы

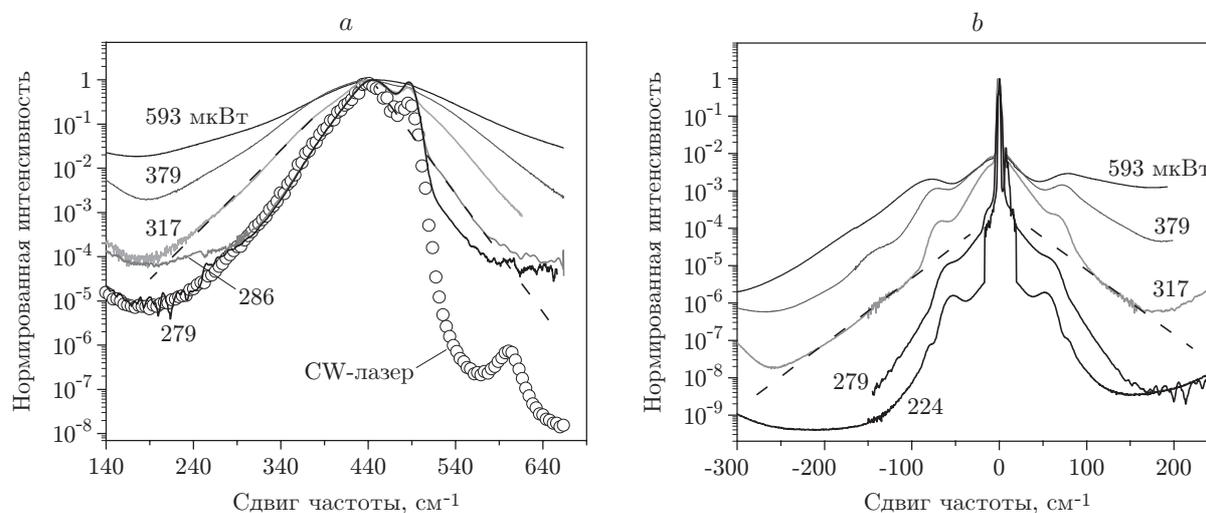


Рис. 5. Спектральная форма линий при различных мощностях накачки: *a* — полоса комбинационного рассеяния света; *b* — упругая линия

интенсивности. Для анализа формы спектры даны с нормировкой на их максимальное значение. На рисунке изображены спектры, которые получены при накачке выше порога генерации ВКР, когда вкладом спонтанного КРС можно пренебречь. Так как спектральная зависимость коэффициента g отражает приведённый спектр КРС кварцевого стекла [6–8], из выражения (5) следует, что логарифм интенсивности полосы ВКР по форме будет совпадать с формой спектра спонтанного КРС в линейной шкале. Здесь же для сравнения показана форма спектра оптоволокна, полученного при непрерывной накачке. Видно, что для значения мощности накачки, незначительно превышающего порог генерации ВКР, формы спектра ВКР и спонтанного КРС находятся в неплохом согласии с предсказанием (5).

Для мощности накачки, существенно превышающей порог генерации ВКР, форма полосы ВКР уширяется по сравнению с ожиданием (см. рис. 5, *a*). Ширина полосы растёт с увеличением мощности накачки, при этом можно выделить характерные экспоненциально затухающие крылья у полосы ВКР (штриховая линия). Нужно отметить, что для всего диапазона, где наблюдается линейная зависимость интенсивности максимума полосы ВКР от мощности накачки (рис. 4, *b*), присутствует также дополнительное уширение полосы ВКР.

На рис. 5, *b* показана форма спектра излучения, вышедшего из оптоволокна, вблизи линии накачки. Видно, что при тех же мощностях накачки (при которых возникает уширение полосы ВКР) лазерная линия также испытывает заметное уширение, описываемое экспоненциально затухающими крыльями (штриховые линии). Уширение лазерной линии, наклон которой уменьшается с увеличением мощности накачки (см. рис. 5), известно для волоконных лазеров и объясняется результатом четырёхволнового взаимодействия продольных мод [9]. Так как характеристики дополнительного уширения полосы ВКР и лазерной линии похожи (см. рис. 5), предполагаем, что механизм уширения полосы ВКР аналогичен механизму уширения лазерной линии в оптоволокне.

Заключение. В данной работе исследованы спектр вынужденного комбинационного рассеяния света и сопутствующие нелинейные процессы, происходящие в одномодовом кварцевом оптоволокне (1,5 м) при субнаносекундной накачке лазером с длиной волны 532 нм. Показано, что интенсивность процесса ВКР хорошо описывается известной теоретической формулой, пренебрегающей истощением накачки, начиная с мощности накачки

ки, где доминирует спонтанное комбинационное рассеяние света, и до мощности накачки ~ 500 Вт, где интенсивность ВКР в 10^6 раз превышает спонтанное КРС. При больших мощностях появляется дополнительное уширение полосы ВКР, величина которого зависит от мощности накачки. Характеристики уширения полосы ВКР на качественном уровне схожи с уширением лазерной линии в оптическом волокне. Высказано предположение, что механизм уширения полосы ВКР аналогичен механизму уширения лазерной линии, описываемой вырожденным четырёхволновым взаимодействием. Полученные экспериментальные характеристики ВКР в оптоволокне при субнаносекундной накачке могут быть использованы при создании преобразователей частоты лазерного излучения в видимом спектральном диапазоне.

Авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат. наук Е. В. Подвигину за полезные обсуждения проблемы ВКР в оптоволокне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Eckhardt G., Hellwarth R. W., McClung F. J. et al.** Stimulated Raman scattering from organic liquids // *Phys. Rev. Lett.* 1962. **9**, N 11 P. 455–457.
2. **Stolen R. H., Ippen E. P., Tynes A. R.** Raman oscillation in glass optical waveguide // *Appl. Phys. Lett.* 1972. **20**, N 21 P. 62–64.
3. **Дианов Е. М., Буфетов И. А., Бубнов М. М. и др.** Непрерывный высокоэффективный ВКР-лазер ($\lambda = 1,24$ мкм) на фосфосиликатном световоде // *Квантовая электроника.* 1999. **29**, № 2. С. 97–100.
4. **Jain R. K., Stenersen K.** Phase-matched four-photon mixing processes in birefringent fibers // *Appl. Phys. B.* 1984. **35**, N 1. P. 49–57.
5. **Сущинский М. М.** Спектры комбинационного рассеяния молекул и кристаллов. М.: Наука, 1969. 576 с.
6. **Stolen H. R., Lee C., Jain R. K.** Development of the stimulated Raman spectrum in single-mode silica fibers // *JOSA B.* 1984. **1**, N 4. P. 652–657.
7. **Auyeung J., Yariv A.** Spontaneous and stimulated Raman scattering in long low loss fibers // *IEEE Journ. Quant. Electron.* 1978. **14**, N 5. P. 347–352.
8. **Lin Q., Agrawal G. P.** Raman response function for silica fibers // *Opt. Lett.* 2006. **31**, N 21. P. 3086–3088.
9. **Babin S. A., Churkin D. V., Ismagulov A. E. et al.** Four-wave-mixing-induced turbulent spectral broadening in a long Raman fiber laser // *JOSA B.* 2007. **24**, N 8. P. 1729–1738.

Поступила в редакцию 15 апреля 2013 г.
